文章编号:1000-4939(2024)02-0352-11

玄武岩纤维缠绕成型管道的损伤及承载能力研究

李涛[1],赵广慧[1,2],段建良[3],王怀安[3],张杰[1,2]

(1. 西南石油大学机电工程学院,610500 成都;2. 石油天然气装备技术四川省科技资源共享服务平台,610500 成都;3 河北华通线缆集团股份有限公司,063399 唐山)

摘　要:玄武岩纤维增强复合材料(basalt fiber reinforced composite,BFRP)具有耐腐蚀性强、比强度高、环保等优点,正确评价 BFRP 管道性能的可靠性和承载能力是将其应用于高附加值的油气输送领域的基础。对于玄武岩纤维(basalt fiber,BF)缠绕成型的复合材料管道,首先在细观尺度上获得浸胶纤维束的强度。然后,沿着管道的轴向和环向分别截取试件,测量了两种试件的拉伸强度;基于试验结果和有限元模拟,研究了管壁结构层在拉伸、压缩以及剪切载荷作用下的损伤演化,得到结构层的宏观本构模型。最后,建立了 BF 缠绕成型管道的有限元模型,研究纤维性能离散对管道承载能力的影响。结果表明,纤维有效含量对管道承载能力的影响很大,从纤维生产和管道成型工艺等方面降低纤维增强作用的离散性对于准确预测管道的承载可靠性,推动 BF 复合材料在油气管道领域的应用至关重要。

关键词:玄武岩纤维缠绕成型管道;复合材料;代表体积单元;损伤演化;承载能力

中图分类号:TB332　　**文献标志码**:A　　**DOI**:10.11776/j.issn.1000-4939.2024.02.009

Study on damage evolution and bearing capacity of basalt fiber wound pipeline

LI Tao[1],ZHAO Guanghui[1,2],DUAN Jianliang[3],WANG Huai'an[3],ZHANG Jie[1,2]

(1. School of Mechanical Engineering,Southwest Petroleum University,610500 Chengdu,China;
2. Sichuan Science and Technology Resource Sharing Service Platform of Oil and Gas Equipment Technology,610500 Chengdu,China;3. Hebei Huatong Wires and Cables Group Co.,Ltd.,063399 Tangshan,China)

Abstract: Basalt fiber reinforced composite (BFRP) has the advantages of strong corrosion resistance, high specific strength and environmental protection. The correct evaluation of the reliability and bearing capacity of BFRP pipeline is the basis for its application in the field of high value-added oil and gas transportation. For composite pipes wound by the basalt fiber (BF), the strength of impregnated fiber bundles is obtained on a meso scale firstly. Then, both axial and circumferential specimens were cut from a pipe and the tensile strength of the two kinds of specimens were measured. Based on both experimental measurement and finite element simulation, damage evolution of structure layers of the pipe wall was studied under conditions of tension, compression and shearing, and the constitutive model of the structure

收稿日期:2021-10-16　　**修回日期**:2022-11-12
基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 52104223)
通信作者:赵广慧,教授。E-mail:zhaogh@swpu.edu.cn
引用格式:李涛,赵广慧,段建良,等. 玄武岩纤维缠绕成型管道的损伤及承载能力研究[J]. 应用力学学报,2024,41(2):352-362.
LI Tao,ZHAO Guanghui,DUAN Jianliang,et al. Study on damage evolution and bearing capacity of basalt fiber wound pipeline[J]. Chinese journal of applied mechanics,2024,41(2):352-362.

layer is obtained. Finally, a finite element model of the BF-wound composite pipe was established, and influences of fiber performances on the pipe's carrying capacity were studied. It is shown that the effective fiber content exerts a great influence on the bearing capacity of the pipe. It is important to reduce the dispersion of fiber reinforcement from aspects such as fiber production and pipe forming process for predicting load-bearing reliability accurately and promoting BF composites application in oil and gas pipeline field.

Key words: basalt fiber winding pipe; composite material; representative volume element; damage evolution; bearing capacity

目前非金属油气管道中最常用的是玻璃纤维(glass fiber,GF)和碳纤维(carbon fiber,CF)。玄武岩纤维(basalt fiber,BF)是一种天然无机非金属纤维,与 GF 相比,BF 在生产过程和废弃降解方面具有环境友好性;与 CF 相比,BF 的拉伸强度相当于 T300 碳纤维,但价格仅为 CF 的十分之一,是 CF 理想的低价替代品。在我国,BF 复合材料制品已经应用于水泥、土工、给排水等民用领域,但在强度及可靠性要求高、产品附加值大的油气管道领域的应用尚未进入,科学预测和评价玄武岩纤维增强复合材料(basalt fiber reinforced composite,BFRP)管道的损伤和强度性能是推动高性能 BF 在油气领域应用的基础[1]。

纤维增强复合材料的细观构造是一个非均匀、各向异性的复杂多相体系,其损伤和失效过程与各组分的性能及其制备工艺密切相关[2-6]。在 BF 纤维增强复合材料的损伤性能研究方面,文献[7]研究了圆缺口和直缺口对 BF 层合板拉伸性能的影响,发现缺口尺寸对层合板的强度影响很大。文献[8]通过单轴拉伸试验研究了 BF、E-GF 和 S-GF 增强复合管的力学性能,发现 BF 复合管的强度介于 E-GF 复合管和 S-GF 复合管之间。文献[9]评估了穿透圆孔的孔径对 BF 增强环氧树脂(EP)层合板试样屈曲性能的影响,层合板的临界屈曲载荷随孔径增大而减小。文献[10]模拟了锯齿形机织 BF 复合材料的三点弯曲性能,增大锯齿形坡度可以有效提高结构的抗弯性能。文献[11-13]试验研究了 BF 对于提高复合材料力学性能的贡献程度。

BF 与其他纤维混合增强的复合材料也吸引着越来越多的研究者[14]。文献[15]研究了 BF、GF 和 BF/GF 增强的 EP 复合管在双轴内压作用下的力学响应,表明 BF/GF 混合增强管道抵抗内压的性能最好。文献[16]研究了 BFRP、GFRP 和 BF/GF 增强复合管在不同纤维缠绕角度下的压溃性能和失效模式,发现 BF/GF 复合管的抗压溃性能最好。文献[17-18]测试了 CF/BF 混合增强 EP 层合板的纤维混合比和铺层顺序对拉伸和弯曲性能的影响,结果表明,铺层顺序对强度和弯曲模量有显著影响,而混合比对弯曲强度有显著影响。

纤维缠绕成型管道一般由内衬层、结构层和外保护层组成,其中内衬层和外保护层为聚合物材料,结构层由浸胶纤维束缠绕到芯模上,经过固化、脱模制得。目前关于纤维缠绕复合材料管道的损伤研究不多。文献[19]对缠绕方式为$[(90°/0°)_2]_S$的 CFRP 圆管进行了拉伸和压缩试验,发现圆管的拉、压弹性模量接近,抗拉强度大于抗压强度,且都是脆性破坏。文献[20]对 GF 缠绕管道在横向土壤载荷下的力学性能进行了数值模拟,与同尺寸、同压力等级的钢管相比,复合管的净弯曲挠度更大。文献[21]对 CFRP 薄壁圆管扭转进行了失效分析,表明圆管损伤形式主要是基体的拉伸损伤。

本研究将从细观和宏观两个尺度对 BF 缠绕成型管道进行损伤分析。首先通过拉伸试验测量 BFRP 管道的轴向强度和环向强度;然后利用多尺度法依次计算浸胶纤维束的强度和管壁结构层的损伤演化性能;进而建立管道性能与纤维、基体以及缠绕工艺参数的关系,定量评价纤维性能对管道承载能力的影响,为推动 BF 复合材料在油气管道领域的应用提供理论基础。

1　拉伸强度试验

试验用 BFRP 试件取自 BF 缠绕成型管道。管道的外径 300 mm,壁厚 7.4 mm。管壁的内衬层为 2 mm厚的超高分子量聚乙烯(UHMWPE),外保护层为 0.4 mm 厚的高密度聚乙烯(HDPE)。结构层的厚度为 5 mm,由 BF 无捻粗纱浸 EP 胶后以与管轴向夹角$(\pm 58°)_5$的方式缠绕成型,结构层中的纤维体积分数 V_f为 45%。各种材料组分力学性能见表 1。管道产品的技术参数为:轴向拉伸的弹性模量和强

度分别不低于9 GPa和55 MPa,环向拉伸的弹性模量和强度分别不低于20 GPa和280 MPa。

表1　组分材料的力学性能参数

Tab.1　Mechanical properties of various materials

参数		BF	EP	UHMWPE	HDPE
弹性模量/GPa	纵向拉伸	139	3.5	0.57	0.85
	横向拉伸	12			
	纵向剪切	8.06			
	横向剪切	1.6			
泊松比	纵向	0.3	0.35	0.46	0.4
	横向	0.3			
强度/MPa	拉伸	4 000	80	21	23
	压缩	2 500	241		
	剪切		60		

从管道上分别沿轴向和环向截取管壁试件,试件尺寸如图1所示。两种试件的夹持端需用树脂涂平,以方便夹持,图1中同时标出了涂平树脂与试件之间的相对位置,以保证拉力作用线通过试件试验段横截面的形心。环向试件的试验段宽度为10 mm,依据纤维缠绕角度58°可知,通过试验段的贯通纤维长度约为95 mm。分别对轴向试件和环向试件实施拉伸试验[22-23]。试验在MTS电液伺服试验机上进行,采用位移控制加载方式。

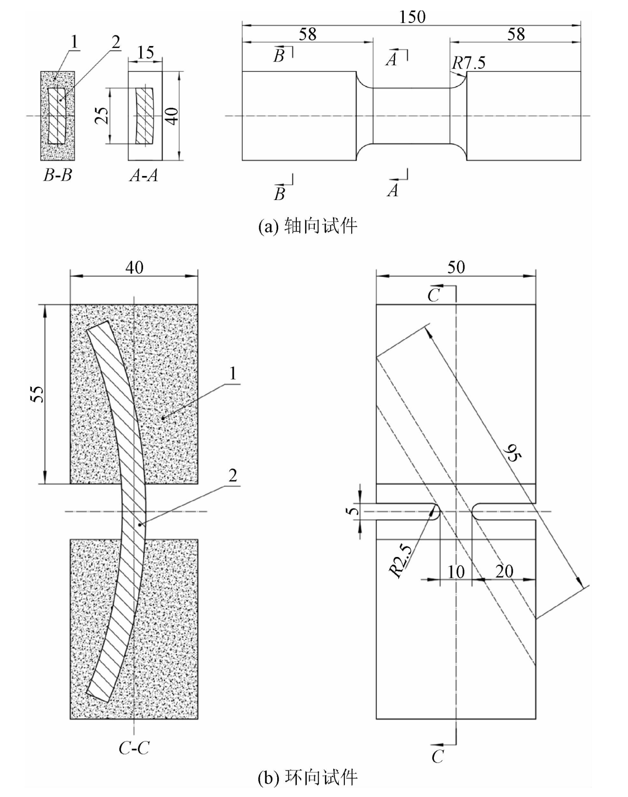


图1　试件尺寸,1-环氧树脂夹持块,2-BFRP试件(单位:mm)

Fig.1　Specimen size,1-EP clamping block, 2-BFRP specimen (unit:mm)

分别对4个轴向试件Z1～Z4以2 mm/min的速率施加拉伸载荷。随着载荷增大,内衬层、外保护层和结构层依次发生分离,拉断后试件如图2(a)所示。内衬层和外保护层为横向平断口,表现为脆性断裂;结构层主要是纤维层间的剥离破坏,只有极少数纤维被拉断,断口呈锯齿状。测得轴向拉伸性能参数见表2,表中同时给出结构层的弹性模量和强度,是由测得的管壁性能参数减去内衬层和外保护层的作用得到。管壁弹性模量和拉伸强度的平均值分别为7.46 GPa和60.72 MPa,试件轴向强度符合管道技术参数,但弹性模量略低,这是由于沿轴向切断纤维所致。鉴于强度是影响管道承载能力的主要因素,下面将依据试件建立管壁的等效本构模型。

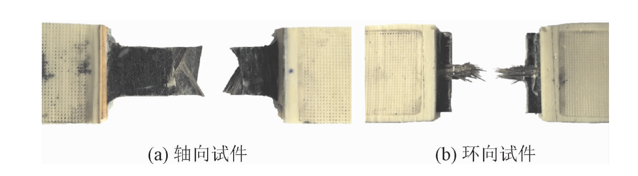


图2　试件拉伸断裂情况

Fig.2　Tensile fracture of specimen

表2　拉伸试验结果

Tab.2　Tensile test results

试件类型	试件编号	弹性模量/GPa		拉伸强度/MPa	
		管壁实测值	结构层	管壁实测值	结构层
轴向试件	Z1	6.36	7.08	55.64	68.40
	Z2	6.57	7.16	69.93	86.95
	Z3	6.92	7.45	60.70	79.16
	Z4	10.00	10.73	56.61	74.08
	平均值	7.46	8.11	60.72	77.15
环向试件	H1	17.90	25.80	461.00	636.28
	H2	19.19	32.85	536.16	769.40
	H3	18.43	30.69	438.13	591.33
	H4	25.45	37.67	620.66	865.93
	平均值	20.24	31.75	513.99	715.74

分别对4个环向试件H1～H4进行拉伸试验,加载速率为1 mm/min。随着载荷增大,依旧是内衬层和外保护层首先发生横向断裂,拉断后试件如图2(b)所示。据观测,试件断面上最长纤维约22 mm,比贯通纤维的半长度短,因此结构层的纤维均为拉断破坏,而非被拉出。测得管壁及结构层的环向拉伸性能参数见表2,管壁的环向弹性模量和强度的平均值分别为20.24 GPa和513.99 MPa,符合管道产品的技术参数。

下面将利用多尺度法依次建立浸胶玄武岩纤维束和管壁结构层的计算模型,通过与本章的实测结果对比,验证计算模型的正确性。

2　浸胶纤维束

管道结构层由连续 BF 无捻粗纱浸 EP 胶后沿 ±58°方向缠绕成型。浸胶纤维束中纤维的体积分数 V_{f1} 为 75%,单丝直径为 7 μm。假设 BF 在 EP 基体中单向均匀分布,取含纤维和基体的六面体作为代表体积单元(RVE),通过计算 RVE 沿各个方向的载荷变形关系得到浸胶纤维束的工程弹性常数,并预测强度性能,为确定管壁结构层的本构性质提供依据。

首先建立 RVE 的几何模型,如图 3 所示。尺寸为 4 μm×13.3 μm×7.7 μm,X 轴沿着纤维束的纵向,纤维与基体绑定。在 RVE 的边界面上施加周期性边界条件。采用六面体单元 C3D8R 分别离散纤维和基体,建立 RVE 的有限元模型。通过网格敏感性分析,网格尺寸取为 0.3 μm 可以得到收敛的结果。

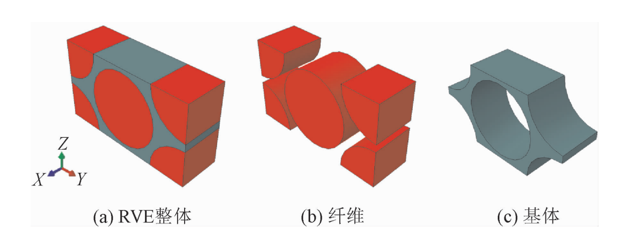


图 3　浸胶纤维束 RVE

Fig. 3　RVE of impregnated fiber bundles

分别沿着 X、Y 和 Z 方向施加拉伸位移载荷、沿 X-Y、Y-Z 和 Z-X 方向施加剪切位移载荷,得到 RVE 沿 6 个方向的平均应力:σ_X、σ_Y、σ_Z、σ_{YZ}、σ_{ZX} 和 σ_{XY},结合位移载荷所对应的 6 个平均应变,得到 RVE 的刚度矩阵,进而确定浸胶纤维束的等效弹性常数,如表 3 所示。表中同时给出利用桥联模型[24]得到的理论解,对比发现,拉伸模量、剪切模量和泊松比的最大相对误差分别为 1.8%、14.9% 和 5.3%,有限元结果与理论解具有较好的一致性。

对于浸胶纤维束强度性能的预测,采用 Rosen 的统计理论模型[25]计算纵向拉伸强度 F_X^t,Budiansky 和 Fleck 模型[26]计算纵向压缩强度 F_X^c,Tsai 和 Hahn 经验公式预测横向拉伸强度 F_Y^t、横向压缩强度 F_Y^c 和剪切强 F_{XY}^s,如式(1)~(4)所示。

表 3　浸胶纤维束的工程弹性常数

Tab. 3　Elastic constants of impregnated fiber bundles

方法	拉伸模量/GPa		剪切模量/GPa		泊松比	
	E_X	$E_Y(E_Z)$	$G_{XY}(G_{XZ})$	G_{YZ}	$\mu_{XY}(\mu_{XZ})$	μ_{YZ}
桥联模型	105.13	8.66	3.83	1.53	0.31	0.36
有限元模型	107.02	8.78	4.50	1.52	0.30	0.38

$$F_X^t = F_{Xf}^t V_f\ ,\ F_X^c = F_{Xf}^c V_f \tag{1}$$

$$F_Y^t = [F_m^t + F_m^t V_{f1}(1/\eta^t - 1)]/K_m^t \tag{2}$$

$$F_Y^c = (3 \sim 7) F_Y^t \tag{3}$$

$$F_{XY}^s = [F_m^s + F_m^s V_{f1}(1/\eta^s - 1)]/K_m^s \tag{4}$$

其中:F 表示浸胶纤维束的强度;η 为经验系数;K 为基体的应力集中系数;上标 t、c 和 s 分别表示拉伸、压缩和剪切;下标中的 X、Y 和 Z 为坐标轴方向;下标 f 和 m 分别表示纤维和基体。基于表 1 的材料性能参数,得到浸胶纤维束的强度,如表 4 所示。

表 4　浸胶纤维束的强度(单位:MPa)

Tab. 4　Strength of impregnated fiber bundles(unit: MPa)

F_X^t	F_X^c	F_Y^t	F_Y^c	F_{XY}^s
3 000	1 853	63	208	107

下面将利用浸胶纤维束的力学参数,模拟管壁结构层的损伤演化,预测管壁结构层的等效本构性能。

3　管壁结构层

依据 BFRP 试件的拉伸强度试验,取 ±58°缠绕的两层浸胶纤维束和基体,分别建立结构层的轴向 RVE 和环向 RVE。为与试件试验段的受力情况更接近,RVE 的面内尺寸依照轴向和环向试件的试验段等比例缩小得到,分别取为 1 mm×3.774 mm×5.343 mm 和 1 mm×1 mm×2.358 mm。如图 4 所示,采用柱坐标系,沿管道轴向设为 z 方向。浸胶纤维束的直径取 0.437 mm,其在 RVE 中的体积分数 V_{f2} 为 60%,这样纤维在结构层中的体积分数 V_f = 45%。浸胶纤维束的本构参数见表 3 和表 4;EP 本构参数见表 1。

首先建立浸胶纤维束和基体的损伤模型,然后模拟结构层 RVE 分别在 6 个方向简单加载下的损伤演化过程,确定结构层的等效强度性能。

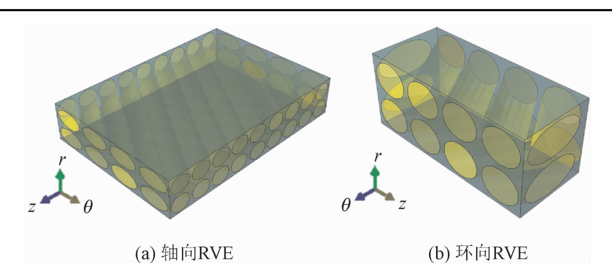


图4 管壁结构层的 RVE

Fig. 4 RVE of wall structure layer

3.1 损伤模型

浸胶纤维束为横观各向同性材料,初始损伤判定采用三维 Hashin 准则[27]。轴向拉、压初始损伤判据分别为

$$\left(\frac{\sigma_X}{F_X^{\mathrm{c}}}\right)^2+\alpha\left(\frac{\sigma_{XY}}{F_{XY}^{\mathrm{s}}}\right)^2+\alpha\left(\frac{\sigma_{ZX}}{F_{ZX}^{\mathrm{s}}}\right)^2\geqslant 1,\left(\frac{\sigma_X}{F_X^{\mathrm{c}}}\right)^2\geqslant 1 \quad (5)$$

Y-Z 方向拉伸剪切和压缩剪切的初始损伤判据分别为

$$\begin{cases}\left(\dfrac{\sigma_Y+\sigma_Z}{F_Y^{\mathrm{t}}}\right)^2+\left(\dfrac{\sigma_{YZ}^2-\sigma_Y\sigma_Z}{2F_{YZ}^{\mathrm{s}}}\right)+\left(\dfrac{\sigma_{XY}}{F_{XY}^{\mathrm{s}}}\right)^2+\left(\dfrac{\sigma_{ZX}}{F_{ZX}^{\mathrm{s}}}\right)^2\geqslant 1\\ \dfrac{1}{F_Y^{\mathrm{c}}}\left[\left(\dfrac{F_Y^{\mathrm{c}}}{2F_{YZ}^{\mathrm{s}}}\right)^2-1\right](\sigma_Y+\sigma_Z)+\left(\dfrac{\sigma_Y+\sigma_Z}{2F_{YZ}^{\mathrm{s}}}\right)^2+\\ \qquad\dfrac{(\sigma_{YZ}^2\text{-}\sigma_Y\sigma_Z)}{(F_{YZ}^{\mathrm{s}})^2}+\left(\dfrac{\sigma_{XY}}{F_{XY}^{\mathrm{s}}}\right)^2+\left(\dfrac{\sigma_{ZX}}{F_{ZX}^{\mathrm{s}}}\right)^2\geqslant 1\end{cases} \quad (6)$$

式中,α 为不同损伤模式对应的贡献因子,这里取为1。基体的初始损伤判定采用最大应力准则,即

$$(\sigma_{\mathrm{m}}^{\mathrm{t}}/F_{\mathrm{m}}^{\mathrm{t}})^2\geqslant 1,(\sigma_{\mathrm{m}}^{\mathrm{c}}/F_{\mathrm{m}}^{\mathrm{c}})^2\geqslant 1 \quad (7)$$

浸胶纤维束和基体的损伤演化过程用损伤因子 D 表示,D 定义为[28]

$$D_K=1-U_K^{I\mathrm{i}}(U_K^{I\mathrm{a}}-U_K^I)/[U_K^I(U_K^{I\mathrm{a}}-U_K^{I\mathrm{i}})] \quad (8)$$

其中:U 为等价位移;上标 I 表示拉伸或压缩损伤模式;上标 i 和 a 分别表示初始损伤和完全损伤;下标 K 表示 X、Y 和 Z 方向。基于 Murakami-Ohno 模型[29],计算损伤后的刚度矩阵。其中,浸胶纤维束和基体的初始损伤准则和损伤演化模型,需要利用 FORTRAN 编写 UMAT 子程序内嵌入 ABAQUS,以模拟 RVE 的损伤演化过程[30]。

3.2 有限元模拟

采用四面体网格对图4所示的 RVE 进行离散。首先进行网格敏感性分析。以网格尺寸为0.1 mm得到的轴向拉伸强度为基准,网格尺寸分别为0.12、0.15、0.2 mm 得到的轴向拉伸强度的相对误差分别为1.2%、2.1%、3.0%。这里将轴向 RVE 和环向 RVE 的网格尺寸分别取为0.12 mm 和0.1 mm,采用 C3D4 单元,对模型中浸胶纤维束和基体单元分别赋予对应的本构参数(表3、表4和表1)和损伤模型。

首先,分别计算轴向 RVE 沿轴向(z 方向)拉伸以及环向 RVE 沿环向(θ 方向)拉伸的损伤演化过程,计算结果与试验进行对比以验证有限元模拟的有效性;然后进一步计算轴向 RVE 的轴向压缩、环向 RVE 的环向压缩和剪切过程,得到结构层等效强度性能。

3.2.1 模型验证

对于轴向 RVE,沿 z 向施加拉伸位移,得到 RVE 的平均应力 $\bar{\sigma}_z$ 和平均应变 $\bar{\varepsilon}_z$ 的变化历程如图5所示,RVE 的轴向拉伸弹性模量为7.00 GPa,轴向拉伸强度为77.56 MPa。与轴向试件拉伸试验结果相对比,弹性模量和强度的相对误差仅为13.7%和0.5%,表明管壁结构层轴向 RVE 的本构模型及损伤模型的有效性。

图5的 $\bar{\sigma}_z$-$\bar{\varepsilon}_z$ 曲线中标出了基体和浸胶纤维束发生初始损伤对应的位置,同时标出了 $\bar{\varepsilon}_z=0.8\%$,1.2%,1.5%的位置,与这3个平均应变对应的损伤云图如图6所示。

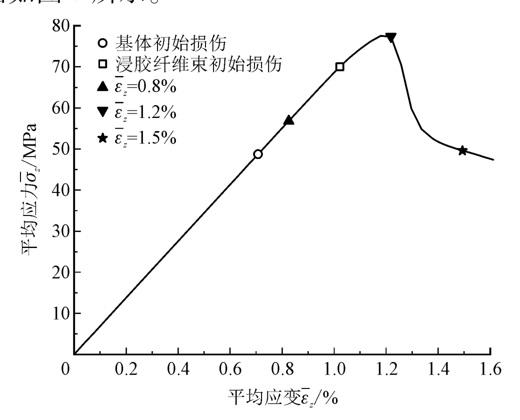


图5 轴向 RVE 沿轴向拉伸的平均应力-平均应变图

Fig. 5 Mean stress-mean strain diagram of axial RVE along axial tension

由图6可知,在 $\bar{\varepsilon}_z=0.8\%$ 时,损伤仅发生在 RVE 的基体部分,浸胶纤维束未损伤。随着载荷逐渐增大,基体的损伤区域逐渐扩大。当 $\bar{\varepsilon}_z=1.2\%$ 时,基体的损伤区域沿着浸胶纤维束的走向,浸胶纤维束也开始出现损伤。载荷进一步增大至 $\bar{\varepsilon}_z=1.5\%$ 时,基体沿浸胶纤维束的走向出现失效,浸胶

纤维束在与基体接触的区域出现局部损伤,RVE 的承载能力急剧下降。可见,管壁结构层的轴向破坏主要来自基体的拉伸分离,预测结果与实测纤维分离的结果相吻合。

图 6　轴向 RVE 沿轴向拉伸时浸胶纤维束和基体的损伤云图

Fig. 6　Damage contours of impregnated during axial stretching

对于环向 RVE,沿 θ 方向施加拉伸位移载荷,得到 RVE 的平均应力 $\bar{\sigma}_\theta$ 和平均应变 $\bar{\varepsilon}_\theta$ 的变化历程如图 7 所示,可以得到环向拉伸模量为 32.61 GPa,环向拉伸强度为 650 MPa。与环向试件拉伸试验结果相对比,弹性模量和强度的相对误差仅为 2.7% 和 9.2%,表明管壁结构层环向 RVE 损伤模拟的有效性。

图 7 中标出了基体和浸胶纤维束在环向拉伸下的初始损伤位置,同时标出了 $\bar{\varepsilon}_\theta$ 分别为 1.0%、2.0% 和 2.5% 的位置,与这 3 个平均应变对应的损伤云图如图 8 所示。在 $\bar{\varepsilon}_\theta=1.0\%$ 时,基体先发生损伤,浸胶纤维束还未损伤;$\bar{\varepsilon}_\theta=2.0\%$ 时基体沿着纤维束的走向出现损伤,部分基体已经失效;当 $\bar{\varepsilon}_\theta=2.5\%$ 时,浸胶纤维束的损伤区域扩大并出现局部失效,基体出现大范围失效,RVE 的承载能力急剧下降。可见管壁的环向强度取决于纤维束的强度。

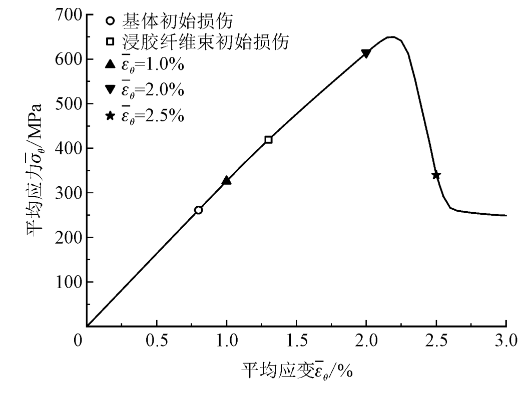


图 7　环向 RVE 沿环向拉伸的平均应力-平均应变图

Fig. 7　Mean stress-strain diagram of RVE stretching along θ-axis

下面将利用此损伤模型模拟结构层 RVE 在压缩和剪切载荷下的损伤演化,连同本节得到的轴向和环向拉伸强度,确定结构层的等效本构性能及其强度。

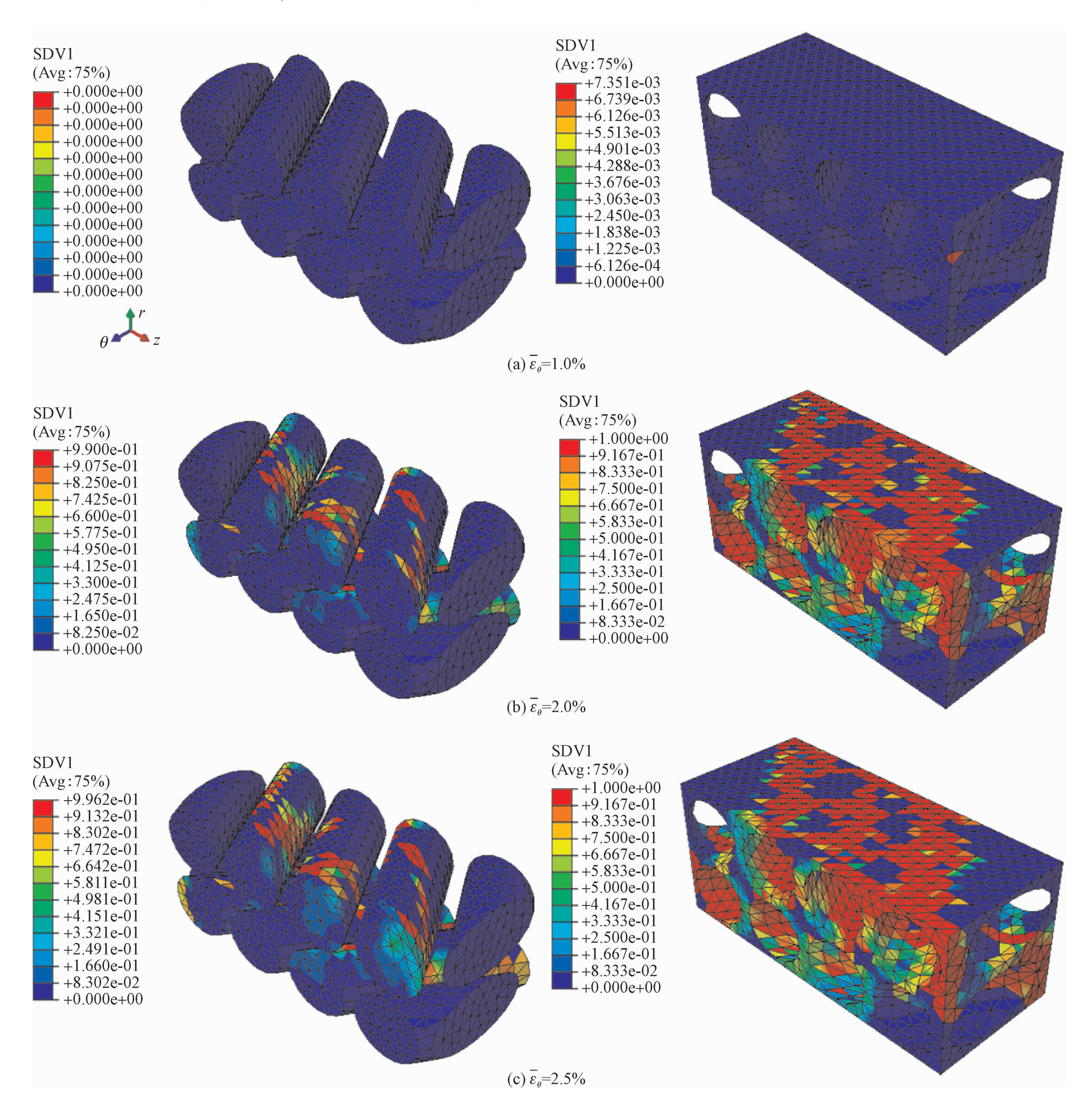


图 8 环向 RVE 沿环向拉伸时浸胶纤维束和基体的损伤云图

Fig. 8 Damage contours during circumferential RVE stretching

3.2.2 损伤演化

对轴向 RVE 施加沿 z 方向的压缩位移载荷,得到 RVE 的平均应力 $\bar{\sigma}_z$ 和平均应变 $\bar{\varepsilon}_z$ 的变化历程如图 9 所示,可知轴向压缩强度为 211 MPa,基体比浸胶纤维束先开始损伤。图 9 中同时给出与 $\bar{\varepsilon}_z$ = −4.8% 对应的损伤云图,此时 $\bar{\sigma}_z$-$\bar{\varepsilon}_z$ 曲线停止上升,进入平台;基体的失效区域仍沿着浸胶纤维束的走向,且基体和纤维都发生了较大范围的损伤。

对环向 RVE 施加沿 θ 方向的压缩位移载荷,得到 RVE 的平均应力 $\bar{\sigma}_\theta$ 和平均应变 $\bar{\varepsilon}_\theta$ 的变化历程以及 $\bar{\varepsilon}_\theta$ = −2.4% 时的损伤云图如图 10 所示,则环向压缩强度为 474 MPa。可见 RVE 沿环向受压时,浸胶纤维束的损伤程度比基体严重。

对环向 RVE 施加沿 θ-z 方向剪切位移载荷,得到 RVE 的平均应力 $\bar{\sigma}_{\theta z}$ 和平均应变 $\bar{\varepsilon}_{\theta z}$ 的变化历程以及 $\bar{\varepsilon}_{\theta z}$ =3.5% 时的损伤云图如图 11 所示,则 θ-z 方向剪切强度为 80 MPa。可见,纤维束和基体基本上同步发生损伤。

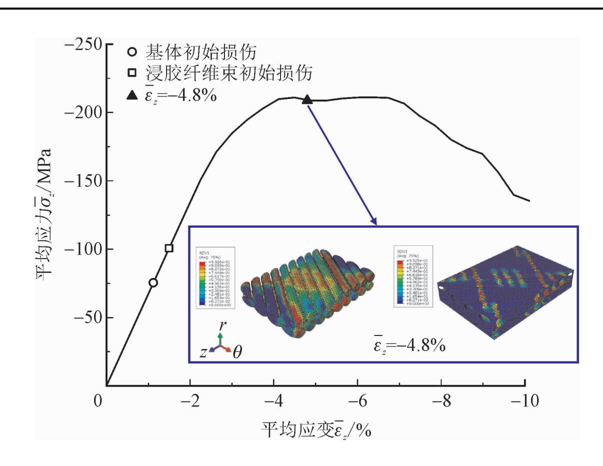


图 9　轴向 RVE 沿轴向压缩的平均应力-平均应变图

Fig. 9　Mean stress-strain diagram of axial RVE compressing along z-axis

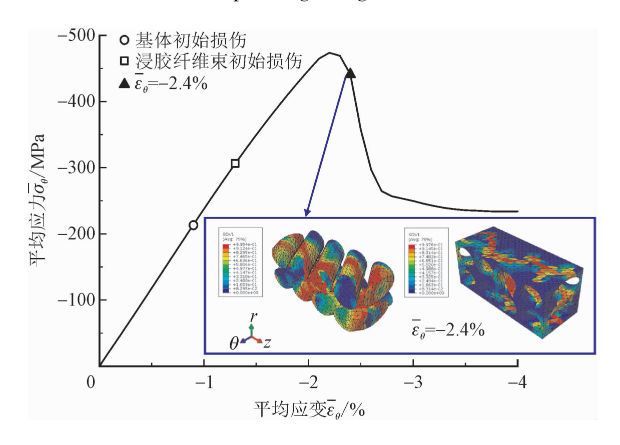


图 10　环向 RVE 沿环向压缩的平均应力-平均应变图

Fig. 10　Mean stress-strain diagram of RVE compressing in θ-axis

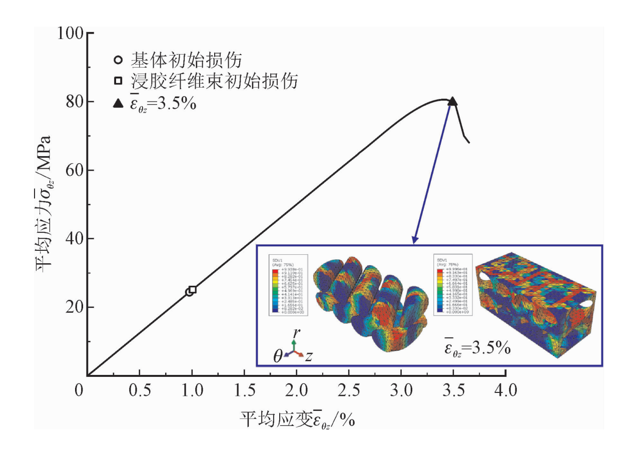


图 11　环向 RVE 沿 θ-z 方向剪切的平均应力-平均应变图

Fig. 11　Mean stress-strain diagram of RVE shearing along θ-z direction

对环向 RVE 施加沿 z-r 方向剪切位移载荷,得到 RVE 的平均剪切应力 $\bar{\sigma}_{zr}$ 和平均应变 $\bar{\varepsilon}_{zr}$ 的变化历程以及 $\bar{\varepsilon}_{zr}=4.6\%$ 时的损伤云图如图 12 所示,则 z-r 方向剪切强度为 106 MPa。类似于 θ-z 方向剪切,纤维束和基体 z-r 方向剪切损伤也基本上是同时发生和发展的,基体的损伤程度比浸胶纤维束更严重。

综合结构层 RVE 在 6 个方向加载过程的模拟结果,得到管道结构层的弹性常数和强度性能如表 5 和表 6 所示,其中 S 表示管壁结构层强度;上标 t、c 和 s 分别表示拉伸、压缩和剪切,下标 r、θ 和 z 为坐标轴方向。下面将利用这些结果研究纤维性能对 BFRP 缠绕成型管道承载能力的影响。

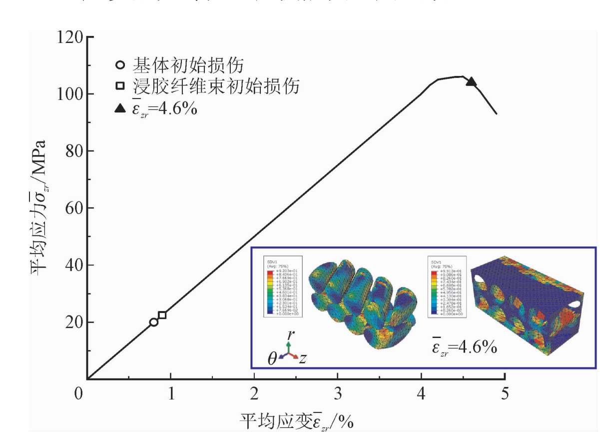


图 12　环向 RVE 沿 z-r 方向剪切的平均应力-平均应变图

Fig. 12　Mean stress-strain diagram of RVE shearing along z-r direction

表 5　管壁结构层的弹性常数

Tab. 5　Elastic constants of tube wall structural layer

E_θ/GPa	$E_r(E_z)$/GPa	$\mu_{\theta r}(\mu_{\theta z})$	$G_{\theta r}(G_{\theta z})$/GPa	G_{rz}/GPa
32.61	7.00	0.28	6.00	2.50

表 6　管壁结构层的强度性能(单位:MPa)

Tab. 6　Strength of tube wall structural layer (unit:MPa)

S_θ^t	S_θ^c	S_z^t	S_z^c	$S_{\theta z}^s$	S_{zr}^s
650	474	78	211	80	106

4　纤维性能离散的影响

受限于目前 BF 的生产工艺和管道缠绕工艺的水平,BFRP 复合材料管道中有相当比例的纤维处于不承载或不完全承载的状态。本章将以公称直径 DN150 的 BFRP 缠绕成型管道为例,以油气输送的压力要求为背景,通过改变管道中完全承载纤维的体积分数,研究纤维离散性对管道承载能力的影响。

DN150 管道的外径为 169.2 mm,壁厚为 11.6 mm。管壁的内衬层和外保护层的厚度分别为 2 mm 和

0.6 mm。结构层的厚度为 9 mm，纤维缠绕方式为 $(\pm58°)_9$，共 18 层。结构层的纤维体积分数 V_f 分别取为 36%、45%、57% 和 65%，建立对应的结构层 RVE，按照第 3 章的方法分别模拟 6 个方向简单加载过程的损伤演化，计算得到不同 V_f 条件下结构层的工程弹性常数和强度参数，如表 7 和表 8 所示。

建立包含 3 层壳结构的有限元模型。为减少边界条件的影响，管道长度需大于外径 5 倍以上，取为 1 000 mm。内衬层和外保护层的本构参数见表 1，结构层的弹性常数和强度值见表 5 和表 6。模型采用 SC8R 单元进行离散，首先进行网格敏感性分析。以网格尺寸为 1.5 mm 得到的结构层最大 Mises 等效应力 σ_{max} 为基准，网格尺寸分别为 2、2.5 和 3 mm 得到的 σ_{max} 的相对误差分别为 1.5%、1.9% 和 2.3%，确定网格尺寸为 2 mm。管道的一端固定、另一端面施加均匀拉应力，同时在管道内表面施加均匀内压，且内压等于 2 倍的轴向应力。

表 7　不同纤维体积分数 V_f 下管道结构层的弹性常数

Tab. 7　Elastic constants of structural layer under different V_f

V_f/%	E_θ/GPa	$E_r(E_z)$/GPa	$\mu_{\theta z}$	$G_{\theta r}(G_{\theta z})$/GPa	G_{rz}/GPa
36	26.51	6.39	0.27	5.50	2.25
45	32.61	7.00	0.28	6.00	2.50
57	42.31	7.96	0.30	6.80	3.00
65	47.73	8.41	0.31	6.90	3.20

表 8　不同纤维体积分数 V_f 下管道结构层的强度参数（单位：MPa）

Tab. 8　Strength of structural layer under different V_f (unit: MPa)

V_f/%	S_θ^t	S_θ^c	S_z^t	S_z^c	$S_{\theta z}^s$	S_{zr}^s
36	534	386	69	195	76	98
45	650	474	78	211	80	106
57	804	591	87	236	85	118
65	907	671	95	261	89	131

逐渐增大载荷，不同纤维体积分数 V_f 下结构层的 Mises 等效应力 σ_0 随等效应变曲线 ε_0 的变化如图 13 所示。由图 13 可知：一开始结构层的 σ_0 随着 ε_0 的增大线性增加；出现损伤后，σ_0 随 ε_0 的上升速率减缓，曲线偏离线性，管道进入强化阶段；进一步加载，当 σ_0 越过最大值后，结构层的承载能力迅速下降，表明损伤快速发展，直至完全失效。V_f 对结构层的刚度和强度均有很大的影响。V_f 越大，则管壁的弹性模量越大，表示管壁的刚度越大。随着 V_f 增大，损伤起始对应的 σ_0 增大，对应的 ε_0 减小，且损伤后的强化阶段变长，结构层的承载能力增强。

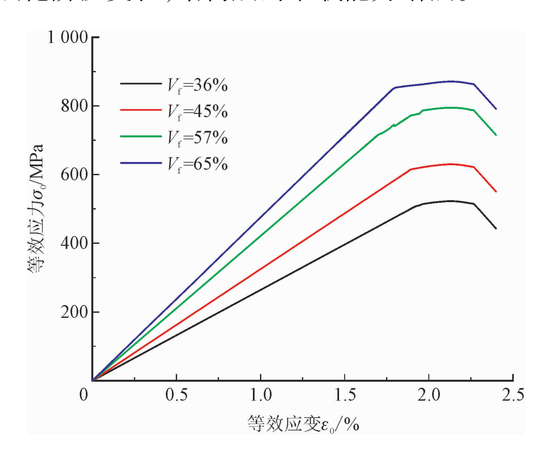


图 13　不同纤维体积分数 V_f 结构层的等效应力-等效应变曲线

Fig. 13　Equivalent stress-strain curves of structural layers with different V_f

以结构层出现损伤对应的 σ_0 衡量管道的极限承载能力，则与 V_f = 36%、45%、57%、65% 的结构层相对应的 σ_0 分别为 49、584、740、870 MPa，可见纤维体积分数从 65% 到 36%，减小 44.6%，导致 σ_0 从 870 MPa 降低为 492 MPa，σ_0 减小 43.4%。管道承载能力随纤维体积分数的变化基本呈线性关系，纤维性能离散性及完全承载纤维的占比对管道承载能力有很大影响，从纤维生产和管道成型工艺等方面降低纤维增强作用的离散性，对于准确预测管道的承载可靠性至关重要。

5　结　论

1）沿着 BFRP 缠绕管道的轴向和环向截取小试件，通过拉伸试验测量了管壁的轴向和环向拉伸强度，通过小试件试验近似获得管道的性能参数。

2）建立了管壁结构层的损伤模型，模拟了结构层轴向 RVE 和环向 RVE 的损伤演化过程，得到的强度结果与试验结果吻合较好，表明结构层损伤模型及模拟方法的有效性。

3）管道承载能力随纤维体积分数的变化基本呈线性关系，纤维性能离散性及完全承载纤维的占比对管道承载能力有很大影响。

4）建立了依据纤维、基体和缠绕工艺模拟 BFRP

管道损伤和强度性能的多尺度方法,为 BFRP 复合材料在油气输送领域的应用提供依据。

参考文献:

[1] 杨明清,秦黎明,付丽霞. 玄武岩纤维管材在石油领域的应用现状及前景分析[J]. 科技导报,2013,31(7):75-79.
YANG Mingqing, QIN Liming, FU Lixia. Application status and prospects analysis for continuous basalt fibre pipe in oil industry [J]. Science & technology review, 2013, 31 (7): 75- 79 (in Chinese).

[2] 王志鹏,李剑峰,李海波,等. 嵌锁式碳纤维/树脂基复合材料方形蜂窝夹芯结构的力学性能及损伤失效[J]. 复合材料学报,2022,39(4):1778-1789.
WANG Zhipeng, LI Jianfeng, LI Haibo, et al. Mechanical properties and damage failure of carbon fiber reinforced polymer composite sandwich structure with square honeycomb core using the interlocking method[J]. Acta materiae compositae Sinica, 2022, 39(4):1778-1789(in Chinese).

[3] 谭丁森,张建勋,秦庆华. 带环形焊缝双金属复合管屈曲失效研究[J]. 塑性工程学报,2021,28(2):154-161.
TAN Dingsen, ZHANG Jianxun, QIN Qinghua. Research on buckling failure of bi-material metal pipe with girth weld [J]. Journal of plasticity engineering, 2021, 28 (2): 154- 161 (in Chinese).

[4] 张晓晴,丁铁,龙舒畅,等. 复合材料加筋壁板的抗冰雹冲击动力响应及损伤预测[J]. 华南理工大学学报(自然科学版),2017,45(5):120-128.
ZHANG Xiaoqing, DING Tie, LONG Shuchang, et al. Dynamic response and damage prediction of composite stiffened panel under hail impact[J]. Journal of South China University of Technology (natural science edition), 2017, 45(5):120-128(in Chinese).

[5] 龙舒畅. 纤维增强复合材料的非线性动力本构与冲击损伤破坏行为[D]. 广州:华南理工大学,2018.

[6] 刘玄,张晓晴. 基于 LS-DYNA 的复合材料层合板低速冲击损伤研究[J]. 科学技术与工程,2012,12(12):2888-2892.
LIU Xuan, ZHANG Xiaoqing. Study on damage of fiber reinforced composite laminate under low velocity impact based on LS-DYNA [J]. Science technology and engineering, 2012, 12 (12): 2888-2892(in Chinese).

[7] SUN G Y, WANG L X, CHEN D D, et al. Tensile performance of basalt fiber composites with open circular holes and straight notches [J]. International journal of mechanical sciences, 2020, 176:105517.

[8] MERTINY P, JUSS K, EL GHAREEB M M. Evaluation of glass and basalt fiber reinforcements for polymer composite pressure piping [J]. Journal of pressure vessel technology, 2009, 131(6):061407.

[9] LAMEA M, DAGHIGH V, SOROUSH M, et al. The buckling behavior of vacuum-infused open-hole unidirectional basalt-fiber composites experimental and numerical investigations [J]. Mechanics of composite materials, 2020, 55(6):761-774.

[10] ZHU L M, LYU L H, ZHANG X F, et al. Bending properties of zigzag-shaped 3D woven spacer composites: experiment and FEM simulation[J]. Materials, 2019, 12(7):1075.

[11] 胡文乐,何朋立,刘华,等. 玄武岩纤维灰土抗剪强度参数优化试验研究[J]. 应用力学学报,2020,37(6):2348-2353.
HU Wenle, HE Pengli, LIU Hua, et al. Experimental study on optimization of shear strength parameters of basalt fiber lime soil [J]. Chinese journal of applied mechanics, 2020, 37 (6): 2348-2353(in Chinese).

[12] 王振山,邢立新,赵凯,等. 硫酸镁侵蚀环境下玄武岩纤维混凝土耐腐蚀及力学性能劣化研究[J]. 应用力学学报,2020,37(1):134-141.
WANG Zhenshan, XING Lixin, ZHAO Kai, et al. Study on corrosion resistance and mechanical property degradation of basalt fiber reinforced concrete under magnesium sulfate erosion environment [J]. Chinese journal of applied mechanics, 2020, 37(1):134-141 (in Chinese).

[13] 王海良,郭富. 玄武岩纤维布加固损伤 RC 梁弯曲疲劳试验研究[J]. 玻璃钢/复合材料,2016(6):25-32.
WANG Hailiang, GUO Fu. Experimental study on flexural fatigue performance of damaged reinforced concrete beams strengthened with BFRP sheets[J]. Fiber reinforced plastics/composites, 2016(6):25-32(in Chinese).

[14] 张辰,饶云飞,李倩倩,等. 碳纤维-玻璃纤维混杂增强环氧树脂复合材料低速冲击性能及其模拟[J]. 复合材料学报,2021,38(1):165-176.
ZHANG Chen, RAO Yunfei, LI Qianqian, et al. Low-velocity impact behavior and numerical simulation of carbon fiber-glass fiber hybrid reinforced epoxy composites[J]. Acta materiae compositae Sinica, 2021, 38(1):165-176(in Chinese).

[15] ALMULA T A D M S, KHUDER A H, YAHYA M Y, et al. Numerical investigation of hybrid of eglass and basalt fiber reinforced epoxy tube pressurized internally[J]. LOP conference series: Materials science and engineering, 2019, 638(1):012012.

[16] ÖZBEK Ö, BOZKURT Ö Y, ERKLIĞ A. An experimental study on intraply fiber hybridization of filament wound composite pipes subjected to quasi-static compression loading[J]. Polymer testing, 2019, 79:106082.

[17] SUN G Y, TONG S W, CHEN D D, et al. Mechanical properties of hybrid composites reinforced by carbon and basalt fibers [J]. International journal of mechanical sciences, 2018, 148:636-651.

[18] CHEN D D, SUN G Y, MENG M Z, et al. Flexural performance and

cost efficiency of carbon/basalt/glass hybrid FRP composite laminates[J]. Thin-walled structures,2019,142:516-531.

[19] 张亮泉,李惠,欧进萍. 纤维缠绕CFRP圆管力学性能的试验及数值模拟研究[J]. 土木工程学报,2009,42(8):50-56.
ZHANG Liangquan, LI Hui, OU Jinping. Experimental and numerical study of mechanical properties of filament-wound CFRP tubes[J]. China civil engineering journal,2009,42(8):50-56(in Chinese).

[20] ALMAHAKERI M, MOORE I D, FAM A. Numerical study of longitudinal bending in buried GFRP pipes subjected to lateral earth movements[J]. Journal of pipeline systems engineering and practice,2017,8(1):04016012.

[21] 孙伟,关志东,黎增山,等. 纤维增强复合材料薄壁圆管扭转失效分析[J]. 复合材料学报,2016,33(10):2187-2196.
SUN Wei, GUAN Zhidong, LI Zengshan, et al. Failure analysis of fiber reinforced composite thin-walled circular tubes under torsion load[J]. Acta materiae compositae Sinica,2016,33(10):2187-2196(in Chinese).

[22] 中华人民共和国国家质量监督检验检验总局,中国国家标准化管理委员会. 纤维增强热固性塑料管轴向拉伸性能试验方法:GB/T 5349—2005[S]. 北京:中国标准出版社,2005.

[23] Japanese Industrial Standard, Japanese Standards Association. Plastics piping systems — glass-reinforced thermosetting plastics (GRP) pipes—determination of the apparent initial circumferential tensile strength:JIS K 7037:1998[S]. Tokyo:Japanese Industrial Standard,1998.

[24] 黄争鸣. 桥联理论研究的最新进展[J]. 应用数学和力学,2015,36(6):563-581.
HUANG Zhengming. Latest advancements of the bridging model theory[J]. Applied mathematics and mechanics,2015,36(6):563-581(in Chinese).

[25] ROSEN B W. Tensile failure of fibrous composites[J]. AIAA journal,1964,2(11):1985-1991.

[26] BUDIANSKY B, FLECK N A. Compressive failure of fibre composites[J]. Journal of the mechanics and physics of solids,1993,41(1):183-211.

[27] HASHIN Z. Failure criteria for unidirectional fiber composites[J]. Journal of applied mechanics,1980,47(2):329-334.

[28] ZHANG D T, CHEN L, SUN Y, et al. Transverse tensile damage behaviors of three-dimensional five-directional braided composites by meso-scale finite element approach[J]. Journal of reinforced plastics and composites,2015,34(15):1202-1220.

[29] 魏坤龙,史宏斌,李江,等. 考虑孔隙缺陷三维编织C/C复合材料渐进损伤及强度预测[J]. 固体火箭技术,2020,43(4):447-457.
WEI Kunlong, SHI Hongbin, LI Jiang, et al. Progressive damage simulation and tensile strength prediction of three-dimensional braided C/C composites considering void defects[J]. Journal of solid rocket technology,2020,43(4):447-457(in Chinese).

[30] KHAYYAM RAYENI H, MAZAHERI A H, TAHERI-BEHROOZ F. Strength prediction of woven composite rings using progressive damage modeling[J]. International journal of damage mechanics,2020,29(6):851-873.

（编辑　李坤璐）